

修士論文

ネットワーク仮想化技術を利用した QoS 予測・予約による V2X 通信の信頼性向上

Improvement of V2X Communication Reliability
by QoS prediction & Reservation
Using the Technology of Network Virtualization

同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

2022 年度 0136 番

国本 典晟 / Tensei Kunimoto

指導教員

理工学研究科 情報工学専攻
ネットワーク情報システム研究室

佐藤 健哉 教授

2024 年 1 月 24 日

Abstract

Due to the limited range of sensors installed in vehicles, research on cooperative autonomous driving aiming at improving traffic safety and efficiency is being conducted by sharing information recognized by sensors on surrounding vehicles and roadside units through communication. By aggregating sensor data collected by each vehicle and roadside unit on a server and delivering integrated information to vehicles, they can acquire information that cannot be recognized by their onboard sensors. However, there is concern that if the number of vehicles concentrated within the area managed by the server exceeds the capacity of the communication bandwidth to the server, the communication bandwidth may become congested, and it may not be possible to guarantee the quality of service (QoS). Additionally, vehicles cannot determine in advance whether QoS will be guaranteed. In this study, we propose using network virtualization technology to centrally manage the network through software, anticipate the concentration of vehicles in advance, and predict QoS. Furthermore, we suggest ensuring vehicle QoS by making reservations for future QoS for vehicles. Through the evaluation using network simulation of the proposed method, we demonstrated that even in cases where the communication bandwidth is congested, the communication delay for vehicles with reserved QoS does not increase.

Keywords

1. Cooperative automated driving, 2. QoS, 3. Network Virtualization

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
第3章	提案手法	4
3.1	ネットワーク仮想化技術を利用したネットワーク	4
3.1.1	協調型自動運転のためのネットワーク	4
3.1.2	ネットワーク仮想化技術による通信制御	4
3.2	QoS 予測	6
3.2.1	コントローラが管理する情報	6
3.2.2	QoS の予測方法	7
3.3	QoS 予約	7
3.3.1	QoS の予約方法	7
3.3.2	QoS の予約時間	9
第4章	評価	11
4.1	ネットワークシミュレーションによる評価	11
4.1.1	評価環境	11
4.1.2	評価結果	11
4.2	机上計算による評価	12
第5章	考察	14
第6章	おわりに	16
	謝辞	17
	参考文献	19
	研究業績	20

第1章 はじめに

1.1 背景

安全で効率的なモビリティ社会の実現を目指して、車両が自動で運転操作を行う自動運転に関する研究が積極的に行われている [1]. 特に、車両に搭載されたセンサの高度化によって、周囲の走行環境を詳しく認識できるようになり、事前に周囲の車両や歩行者、障害物を検知して、自動で減速・停止等を行い危険を回避する取り組みが進められている。しかし、自車両に搭載されたセンサのみでは、建物の陰にいる歩行者を認識できないなど、認識できる範囲は限定的である。そのため、建物の陰から急に飛び出した歩行者や、見通しの悪い交差点における出会い頭の事故などには対応が困難であるという問題がある。こうした状況に対応するため、車両と、車両や路側機などの様々なものの無線通信である V2X (Vehicle to Everything) 通信を利用して、安全性の向上を目指す協調型自動運転の研究が行われている [2, 3]. 協調型自動運転では、図 1 に示すように、車両や路側機は自身が搭載するセンサで収集したセンサ情報や走行情報などをサーバに送信する。そして、サーバは送信された情報を統合し、統合した情報を再度車両に送信する。この情報には他の車両や路側機に搭載されたセンサで収集された情報が含まれているため、車両は自車両に搭載されたセンサだけでは認識できない周囲の走行環境を認識することができるようになり、見通しの悪い環境における事故を回避することができる。

情報を統合するサーバは、処理負荷の分散や通信遅延の軽減のために地理的に分散されており [4], サーバにはそのサーバが管轄するエリア内の全ての車両や路側機から定期的に情報が集約される。しかし、サーバまでの通信帯域は限られている場合が多く、車両が集中した場合に使用可能な通信帯域以上に通信帯域を必要としてしまい、通信帯域が逼迫することが懸念される [5]. 協調型自動運転では、事故の回避等のために情報が必要となるため、低遅延での情報の送受信が求められるが、通信帯域が逼迫すると情報の送受信の遅延が増大するため、許容される遅延時間内に情報を受け取ることができず、通信の品質 (Quality of Service, 以下 QoS) が保証されない。また、車両は事前に通信の QoS が保証されるか否かを把握することができないままに協調型自動運転を試みることになるため、安全性や効率の点で重大な問題となる。

1.2 目的

本研究では、車両が集中した場合に通信の QoS が保証されず、そのことを車両が事前に判断することができない問題を解決するため、ネットワーク仮想化技術を利用して通信の QoS を予測し、車両の将来の通信の QoS を予約することを提案する。ネットワークシミュレーションを用いて通信モデルを構築し実験を行い、提案手法の有効性を評価する。

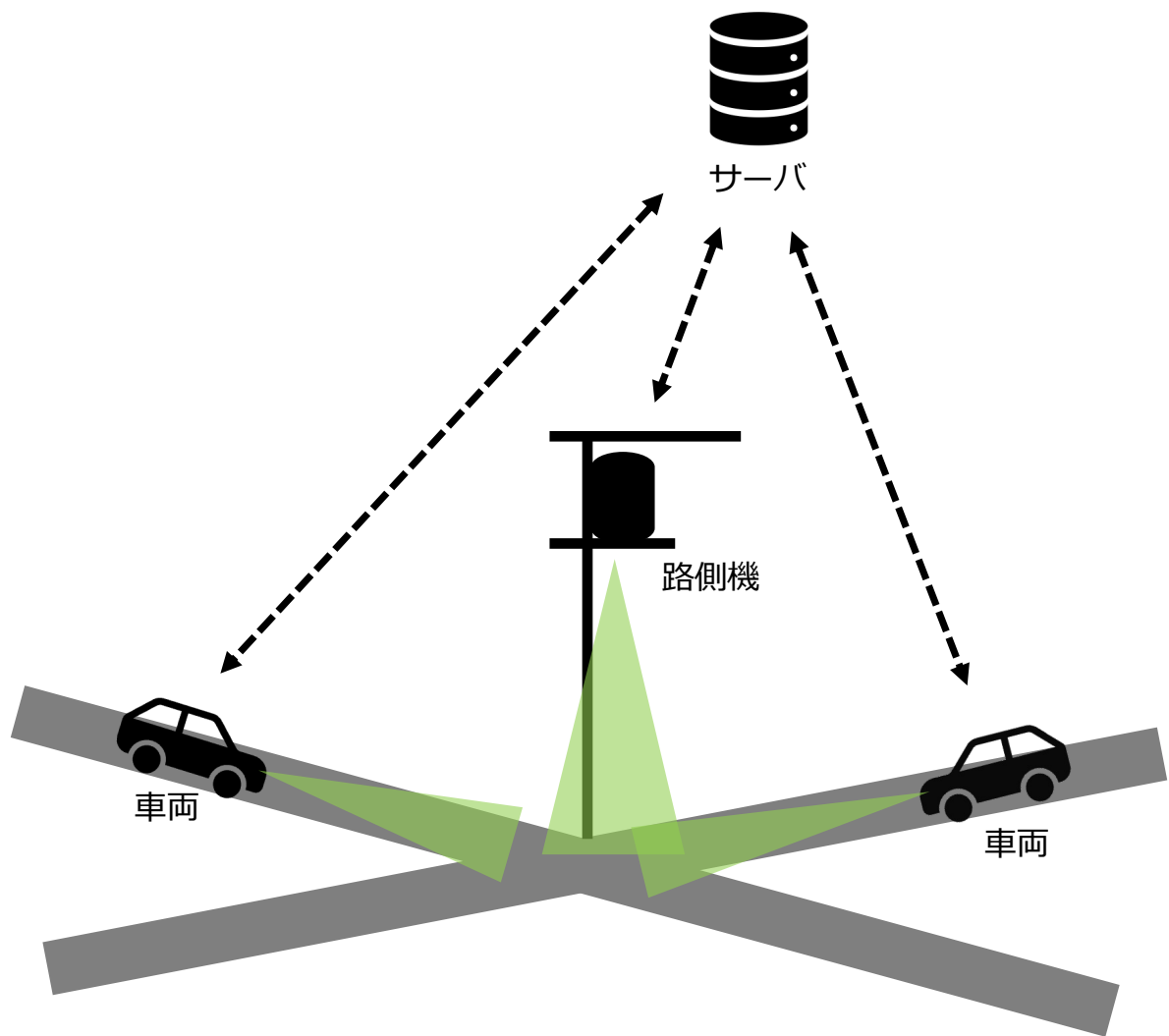


図 1: サーバを用いた協調型自動運転

1.3 本論文の構成

第2章では、協調型自動運転のV2X通信のQoS予測を行った関連研究について述べる。第3章では、ネットワーク仮想化技術を利用したV2X通信の制御と、QoSの予測および予約の方法について述べる。第4章では、提案手法の有効性を評価するための実験方法とその評価結果について述べる。第5章では、実験によって得られた結果に対して考察を行う。第6章では、本論文のまとめを述べる。

第2章 関連研究

協調型自動運転では、車両が周囲の車両や路側機、サーバなどリアルタイムで情報を共有することで、安全かつ効率的な交通システムを構築することができる。車両による事故を防ぐなどのユースケースに対して V2X 通信を行うため、協調型自動運転のための通信は厳しい QoS の要件が決められており、通信遅延などの通信品質について詳細に要求されている [6]。しかし、V2X 通信では車両の高い移動性や交差点における車両の集中など、様々な要因が通信の QoS に影響を与える [7]。QoS の急激な低下が発生した場合、協調型自動運転の機能不全が発生し、状況によっては人間の安全を脅かす可能性がある [8]。そのため、QoS の予測は重要であり、QoS の変化を予測することで事前に必要な対策を講じることができる。

Barmounakis らは、5G のネットワークからデータを収集・分析する機能を利用して QoS に関する指標を求め、地図情報をグリッドに分割して QoS の指標を用いてクラスタリングすることで、機械学習を用いて QoS を予測した [9]。ネットワークシミュレータを用いた実験により、クラスタの数と予測精度のトレードオフの関係を示した。また、Xu らは、深層学習モデルの 1 つである Transformer [10] の長期時系列予測モデルである Informer [11] を利用し、V2X 通信の時間的および局所的な特徴を考慮した QoS 予測を行った [12]。実際の交通渋滞を模倣した環境で V2X 通信に関するデータを収集し、パケットロス率および通信遅延について予測精度の向上を示した。

これらの研究を含めて、V2X 通信の QoS 予測に関する研究は機械学習を用いたものが多く見られ、V2X 通信特有の拘束条件のもとに、複数の機械学習の比較や計算効率性の向上を目指している。機械学習を用いた予測では過去のデータから傾向をもとに予測を行うため、例えばある道路において通勤時間帯に車両が集中するというデータがある場合、次の日もその時間帯に道路は集中すると予測する。しかし、道路工事や交通事故などにより車両の走行ルートに変更が生じた場合、道路が集中するエリアを正しく予測できない可能性がある。そのため、過去のデータだけではなく、現時点での車両の走行ルートなどの情報から、近い将来の QoS を予測することが重要である。また、車両は自身の情報およびサーバから受信する情報しか持たないため、他の車両の走行ルートなどからある地点での QoS が保証されるかを予測することができない。したがって、QoS 予測のもとに各車両の QoS が保証されるかを判別し、車両に通知する仕組みが必要となる。

第3章 提案手法

3.1 ネットワーク仮想化技術を利用したネットワーク

3.1.1 協調型自動運転のためのネットワーク

協調型自動運転における車両とサーバの通信方式については様々な種類のものが議論・検討されているが、ここではセルラーネットワークを利用して基地局を介して通信する方式を考える。車両は協調型自動運転を行うに際して、近くにある基地局を介してサーバと通信を行う。サーバをどれほどの間隔で地理的に分散配置し、サーバ1台あたり何基の基地局と対応するかについても、基地局1基にサーバが1台とするなどの様々な議論があるが、本研究では複数の基地局に対して1台のサーバが対応するネットワークを考える。サーバは自身が対応する基地局の通信範囲内を管轄するエリアとして、管轄エリア内の車両の協調型自動運転に関する通信や情報の処理を担当する。

3.1.2 ネットワーク仮想化技術による通信制御

通信のQoSを予測・予約するにあたり、車両と基地局、サーバの通信を制御するために、本研究ではネットワーク仮想化技術を利用する。ネットワーク仮想化技術とは、ソフトウェアを介してネットワークを一元管理する技術である。ネットワーク仮想化技術では、コントローラと呼ばれる機器がネットワークの状況の把握や経路の変更・更新を行うため、状況に合わせた柔軟なネットワークの変更が可能となる。本研究では、図2に示すように複数のサーバとその管轄エリア内の車両との通信を1台のコントローラが管理することを考える。コントローラは、サーバと接続し、QoS予測に必要な情報を車両やサーバから受け取る。その後、コントローラが3.2節で述べるQoS予測を行い、車両に対して3.3節で述べるQoS予約を行う。なお、コントローラとサーバは有線で接続されており、通信遅延やパケットロスなどの影響は極めて小さいものとする。

ネットワーク仮想化技術を利用して通信制御を行うにあたり、コントローラは車両とサーバ間の通信帯域を図3のように3つに分類する。

QoS予測・予約に必要な通信帯域

この通信帯域はコントローラがQoSを予測するのに必要な情報を車両から収集したり、QoSの予約を車両に通知したりするために用いられる。通信帯域が逼迫した際に、QoS予測・予約に必要な通信のQoSが保証できない場合、その次のQoSの予測や、車両がこれから到達する地点においてQoSが保証されるか否かの通知に障害が発生する可能性がある。そのため、この通信帯域は常に確保されているのとし、仮にサーバの管轄エリア内に物理的に限界な台数まで車両が集中したとしても、この通信帯域が全体の通信帯域を超えることはないように全体の通信帯域が設定されているものとする。この通信帯域で行われる通信の内容は時刻によって大きく変化するものではなく、1台あたりの通信量は大きく変化しないが、車両台数の増減に比例して通信量も変化する。

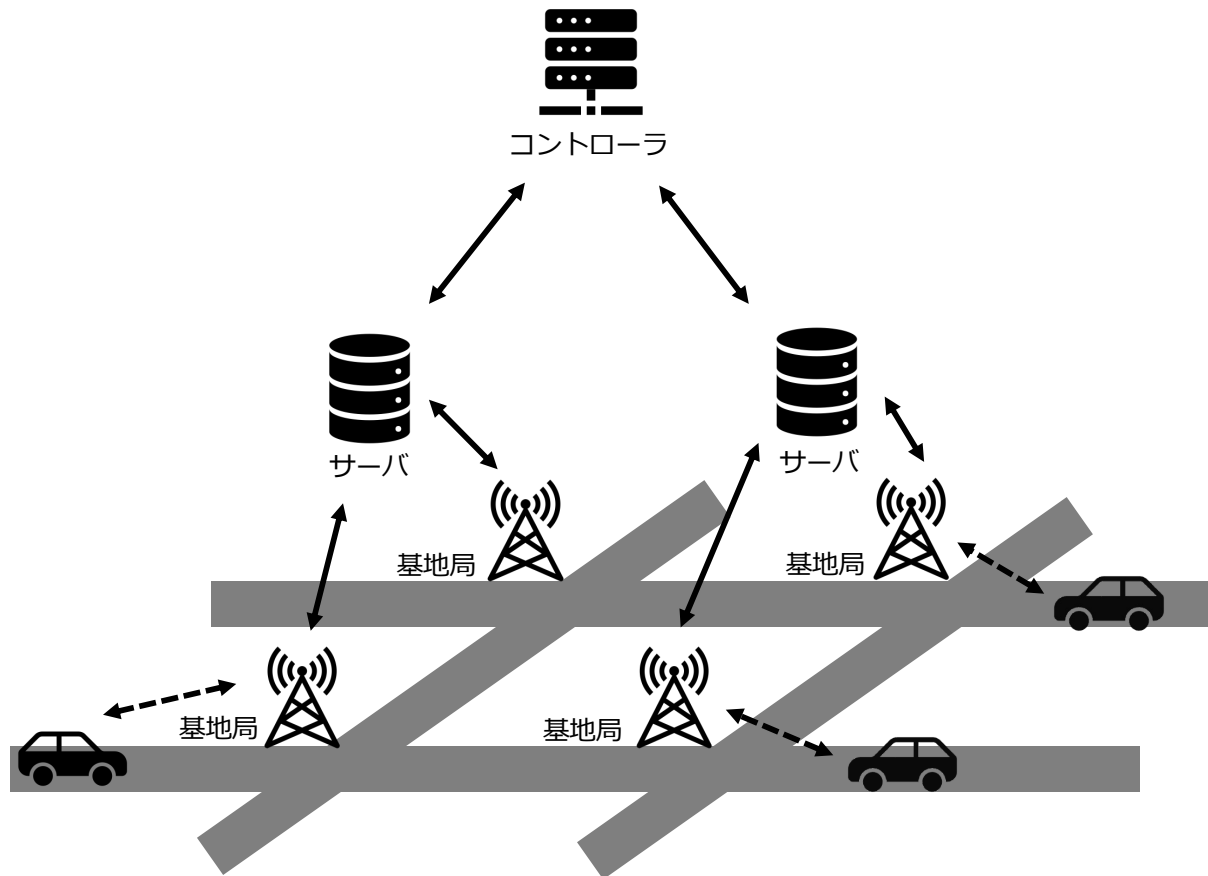


図 2: ネットワーク仮想化技術を利用した V2X 通信の制御

協調型自動運転のための通信帯域

この通信帯域は、協調型自動運転を行うため、車両が自身の走行情報や自車両に搭載されたセンサで認識した情報等をサーバに送信したり、サーバが複数の車両や路側機から収集・統合した情報を車両に送信したりする際に用いられる。この通信帯域で行われる通信の通信量は、車両の運転操作や周囲の走行環境等によって変化し、その通信量は QoS 予測・予約のための通信と比較して通信量が大きいため、サーバの管轄エリア内に車両が集中することにより、通信帯域が逼迫する恐れがある。したがって、本研究ではこの通信帯域を対象として QoS の予測・予約を行う。

常に確保しておく余剰の通信帯域

この通信帯域は、通信量の変動や QoS 予測の誤差を吸収するために、常に一定分確保されている通信帯域である。車両台数等によって変動することではなく、他の 2 つの通信帯域と比較してそれほど大きな通信帯域ではない。QoS 予測・予約においては使用可能な通信帯域から除外して考える。

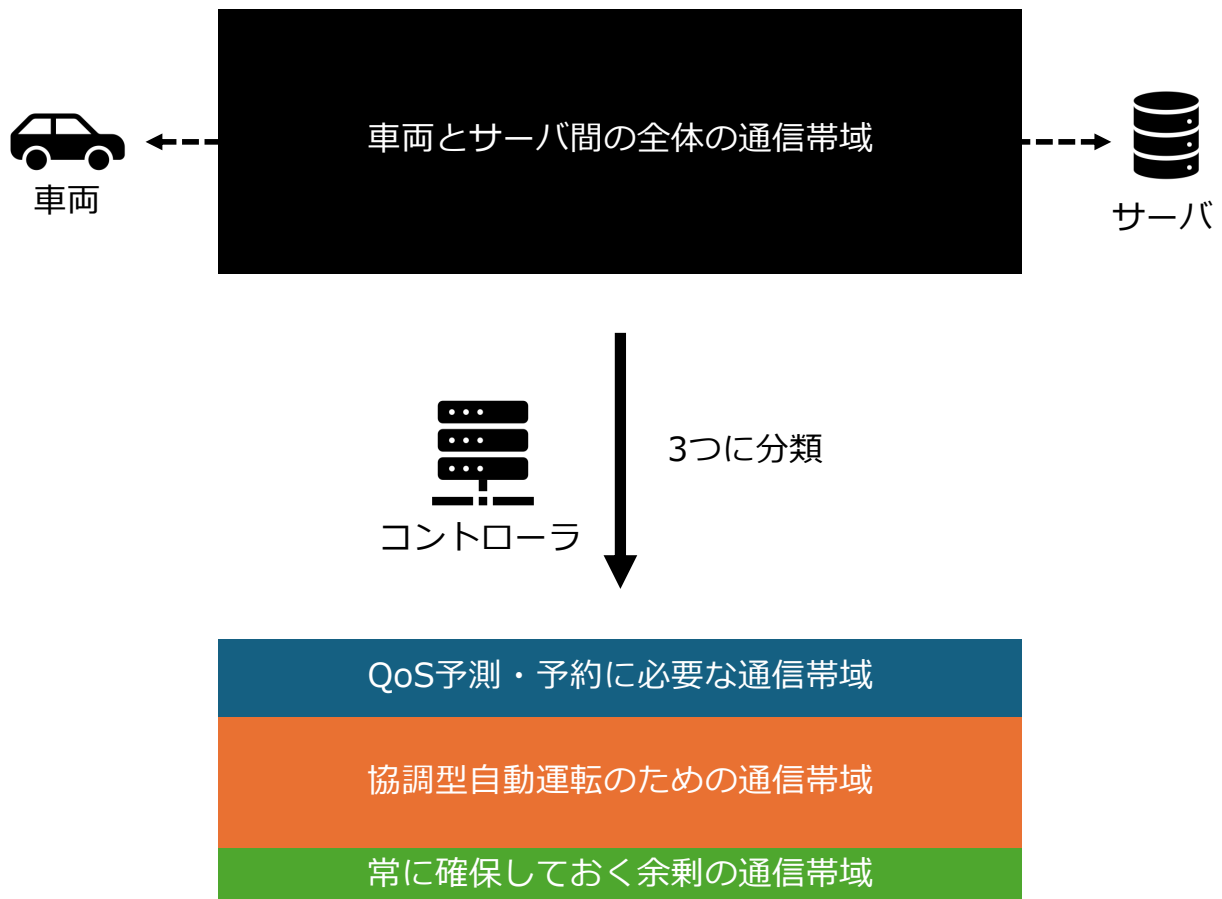


図 3: コントローラによる通信帯域の分類

3.2 QoS 予測

3.2.1 コントローラが管理する情報

サーバの管轄エリア内に車両が集中した場合、協調型自動運転のための通信の通信量が増大し、通信帯域が逼迫する恐れがある。したがって、協調型自動運転のための通信の QoS を予測するためには、コントローラは一定時刻後のサーバの管轄エリア内の車両の集中状況および使用される通信帯域を予測する必要がある。そのために、コントローラは以下の情報を保持している。

- コントローラの管轄エリアの地図情報
- コントローラが管轄するサーバおよび基地局の位置
- コントローラが管轄する各サーバにおいて使用できる最大の通信帯域
- 3.3 節で述べる QoS 予約によってすでに確保されている通信帯域

また、コントローラは車両から以下の情報を定期的に受け取る。

- 車両を一意に識別可能な ID（車両 ID）
- 走行計画

以上の情報を用いて、コントローラは一定時刻後の通信の QoS を予測する。

3.2.2 QoS の予測方法

協調型自動運転のための通信の QoS が保証されるかは、一定時刻後に使用される予定の通信量の合計を求め、使用できる最大の通信帯域と比較することで予測することができる。一定時刻後に使用される予定の通信量の合計を求めるために、一定時刻後の車両の運転操作および集中状況を考える。QoS 予測の手順を図 4 に示す。コントローラは車両から定期的に受け取る走行計画から、一定時刻後の車両の予測位置を把握することができる。ここで、一定時刻後のあるサーバの管轄エリア内の予測車両台数を N 、1 台あたりの QoS 予測に必要な通信帯域を B_{pred} とすると、QoS 予測に必要な通信帯域は

$$N * B_{pred} \quad (1)$$

で求められる。また、QoS の保証および予約は連続的に行われるため、一定時刻後の通信帯域において、それよりも前の時刻にすでに QoS が保証されている、すなわち通信帯域の一部が確保されている場合がある。したがって、すでに確保されている通信帯域を B_{saved} 、利用できる最大の通信帯域を B_{max} とすると、一定時刻後に利用可能な通信帯域は

$$B_{max} - (N * B_{pred} + B_{saved}) \quad (2)$$

となる。 N 台全ての車両が協調型自動運転のための通信を行った場合に、この通信帯域で逼迫することがないかを予測することで、QoS を予測することができる。協調型自動運転のための通信で使用する通信帯域は、車両の運転操作や周囲の走行環境や運転操作によって異なる。ある車両の協調型自動運転における使用予測通信帯域を B_{CAD} とすると、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} > B_{max} - (N * B_{pred} + B_{saved}) \quad (3)$$

であるときに、 N 台全ての車両の通信の QoS を保証することはできないと予測される。なお、使用予測通信帯域はあくまで予測されたものであり、多少の誤差を含む可能性があるため、3.1.2 項で述べたように

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} > B_{max} - \{(N * B_{pred} + B_{saved}) + B_{extra}\} \quad (4)$$

のように誤差を吸収できる余分な通信帯域 B_{extra} を考慮して計算するべきである。

3.3 QoS 予約

3.3.1 QoS の予約方法

通信帯域が逼迫し、通信の QoS が保証されないことを車両が事前に判断できない場合、車両は通常時と同様に通信を試みるが、必要な情報を協調型自動運転で許容される時間内に受け取ることができないため、自車両が持つ情報のみで運転操作を行わなければならない、安全や効率の点で重大な問題となる。そこで、本研究では、図 5 に示すように、QoS 予測の結果をもとに、一定時刻後における通信帯域を車両ごとに確保するとともに、QoS が保証されるか否かを車両に通知する。その時刻におい

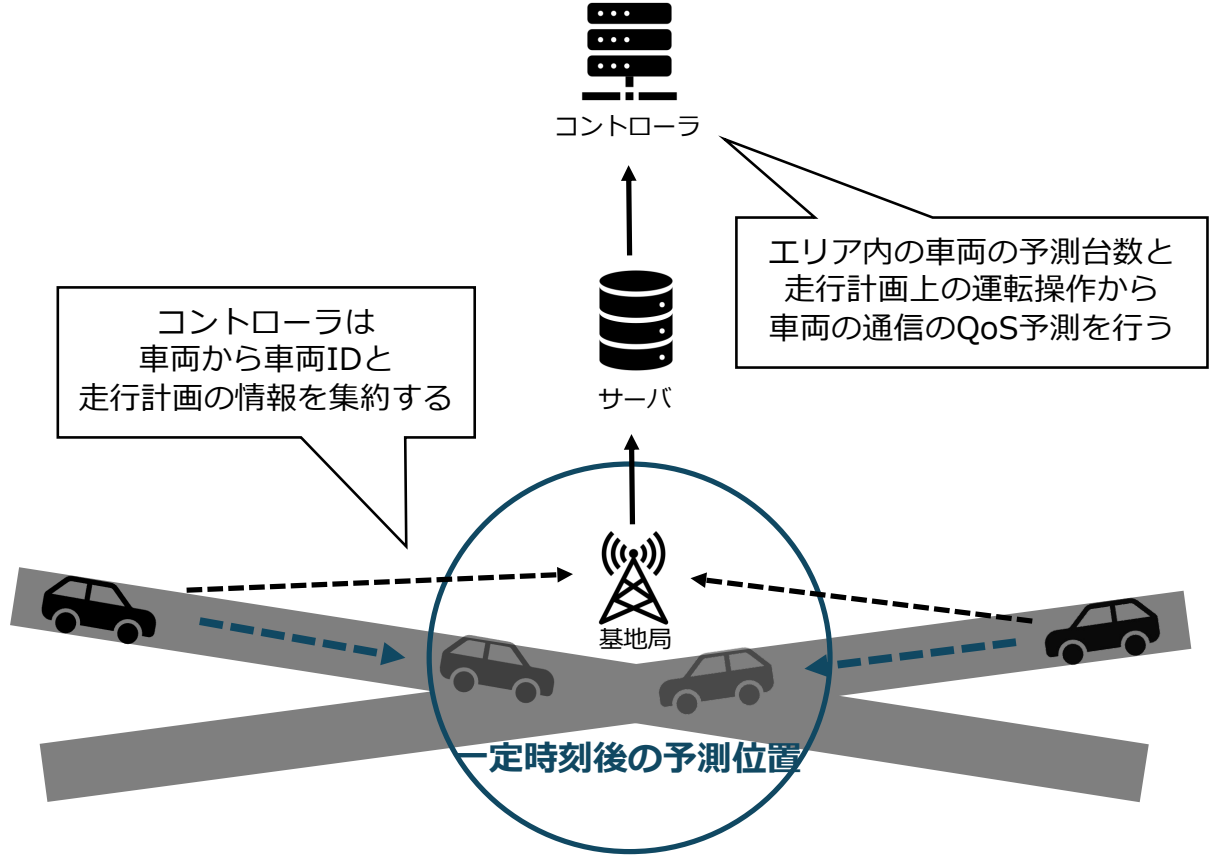


図 4: QoS 予測の手順

て協調型自動運転のための通信を行う車両を事前に決定することで、車両が集中した場合であっても通信帯域の逼迫を防ぐことができる。

まず、QoS 予測の結果、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} \leq B_{max} - \{(N * B_{pred} + B_{saved}) + B_{extra}\} \quad (5)$$

となった場合、すなわち、全ての車両に対して一定時刻後の通信の QoS を保証することができると予測した場合を考える。この場合、コントローラは一定時刻後の全ての車両の通信の帯域を確保し、車両 ID をもとに該当する車両に対して一定時刻後の通信の QoS が保証されることを通知する。これにより、全ての車両は問題なく協調型自動運転のための通信を行うことができる。

次に、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} > B_{max} - \{(N * B_{pred} + B_{saved}) + B_{extra}\} \quad (6)$$

となった場合、すなわち、全ての車両が通信を行った場合に通信帯域が逼迫し、通信の QoS が保証できないと予測した場合を考える。この場合、全ての車両が通信を行った際に、通信帯域の逼迫により全ての車両が協調型自動運転の許容時間内に情報が受け取れない可能性があるため、通信帯域が逼迫しないように一部の車両を選択して QoS を保証し、残りの車両には通信を行わないよう通知することで通信帯域の逼迫を防ぐ。QoS を保証する車両の選択は、一定時刻後における車両の運転操作

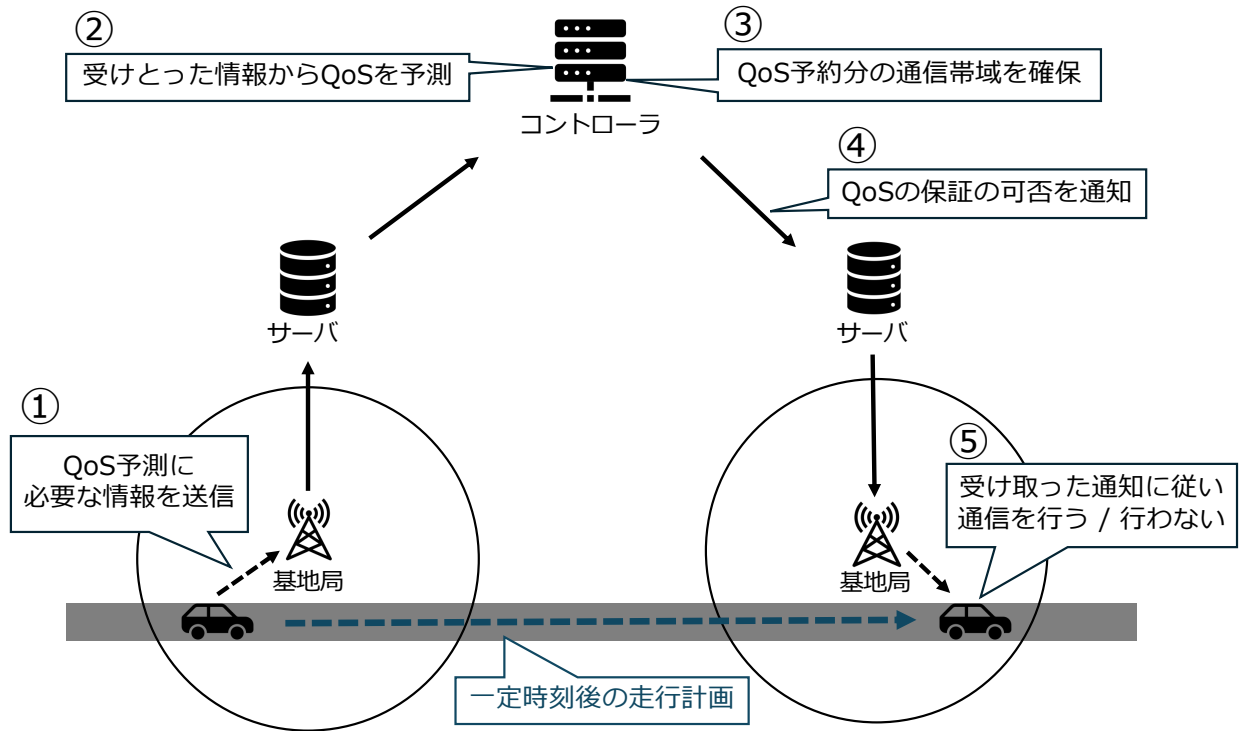


図 5: QoS 予測・予約の手順

の優先度を考慮して決定する．例えば，一定時刻後において，他車両と調停しながら右左折を行なっている最中である車両と，特に前後の時刻と変わらず直進を続けている車両がいた場合，右左折を行なっている車両の通信の QoS を優先的に保証する．優先度による車両の選択の後，同じ優先度から車両を選択しなければいけない場合はランダムに選択する．しかし，本研究では検討の対象外としたが，QoS が保証されない車両も安全かつ効率的な運転のために，迂回経路の使用やその他の通信の併用などの方法で対策が必要であり，同じ優先度から選択する場合はそういった対策との兼ね合いを考慮して選択するのが望ましい．

3.3.2 QoS の予約時間

図 6 に示すように，一定時刻後に交差点を右折する車両の通信の QoS を保証する場合を考える．この時，一定時刻ごとに新たに QoS を保証する車両を選択しているとすると，右折開始時には QoS が保証されていたにもかかわらず，右折途中の新たな QoS 予約で QoS が保証されなくなる，といった事態が発生する可能性がある．右折などの周囲の車両と調停を必要とする運転操作や，自車両のセンサのみでは認識できない走行環境の認識を必要とする運転操作を行なっている最中に協調型自動運転のための通信を行えないと通知された場合，突然情報が遮断されることになるため，安全性に重大な問題が生じる．そのため，QoS を予約する際に，コントローラは車両から受け取った走行計画から一定時刻後の運転操作を把握し，必要に応じてあらかじめそこから一定時間の通信帯域もまとめて予約しておく．これにより，協調型自動運転のための通信の優先度が高い運転操作は，開始前に通信の QoS が保証されると通知されれば，その運転操作が完了するまで通信の QoS は保証されることになる．QoS 予約された通信帯域は，3.2.2 項の B_{saved} としてコントローラが保持し，以降の QoS 予測の際に使用可能な通信帯域から除いて計算する．運転操作が完了すると，車両はそのことをコントローラ

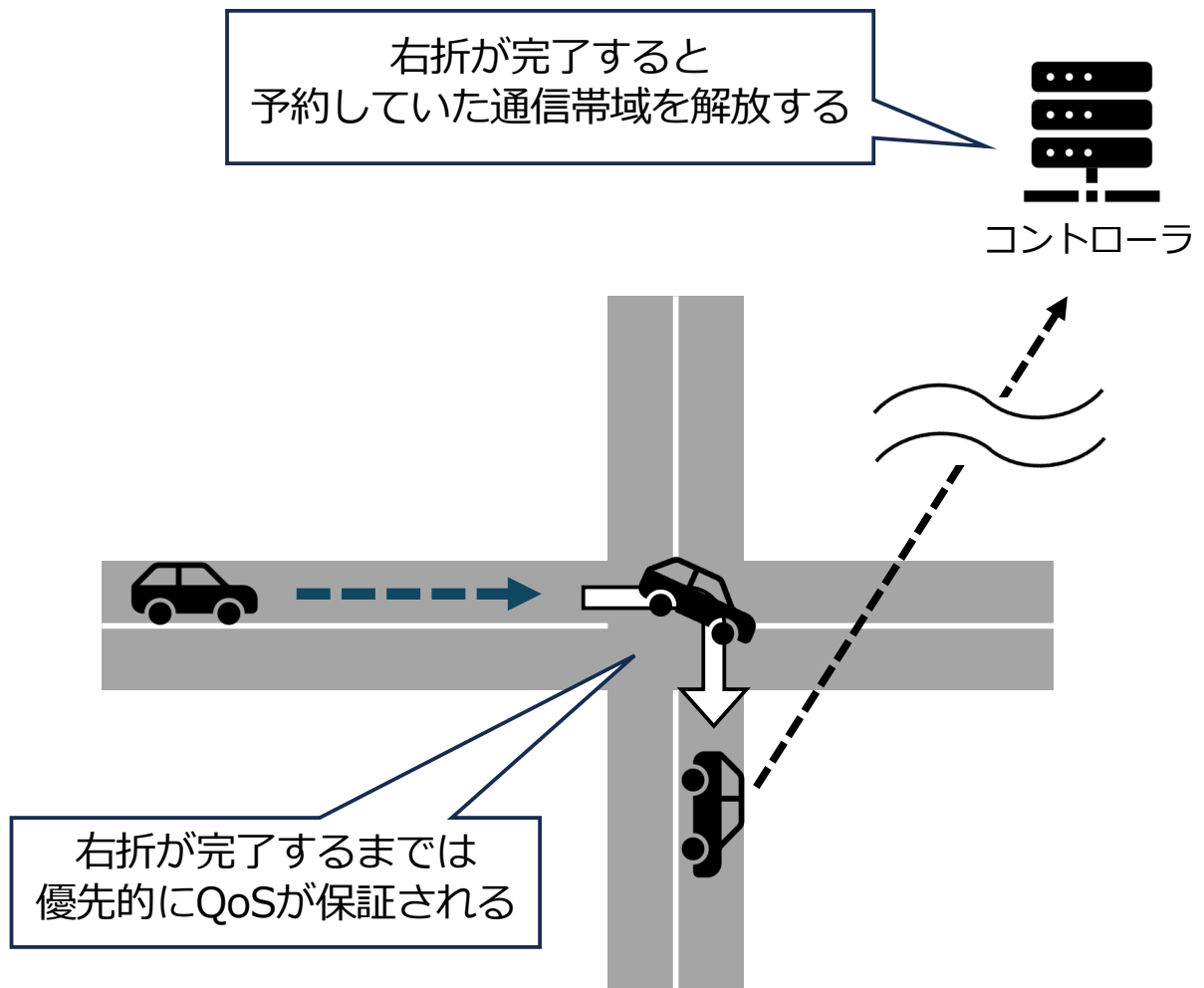


図 6: 右折時の QoS 予約

ラに通知し、通知を受け取ったコントローラは予約していた通信帯域を解放し、使用可能な通信帯域として計算する。

第4章 評価

4.1 ネットワークシミュレーションによる評価

4.1.1 評価環境

提案した QoS 予測・予約を適用することで、通信性能にどのような影響を与えるかを検証するため、ネットワークシミュレータである ns-3 [13] を用いてシミュレーションによる評価を行った。図 7 に示すようなネットワークモデルを構築し、サーバから車両に対して協調型自動運転のための通信のシミュレーションを行った。シミュレーションは QoS 予測・予約を行わない場合と行う場合のそれぞれを行い、車両台数を変化させて通信性能を比較することで QoS 予測・予約の有効性を評価した。

QoS 予測・予約を行わない場合は、通信帯域が逼迫しているか否かに関わらず、サーバから車両に対して協調型自動運転のための通信を試み続ける。一方で、QoS 予測・予約を行う場合は、QoS 予測・予約によって通信帯域が確保される車両をあらかじめ計算し、その台数の車両に対してのみ協調型自動運転のための通信を行う。QoS 予測・予約にも通信帯域を消費するため、QoS 予測・予約を行う場合は、QoS 予測・予約に必要な通信帯域を車両台数より計算し、行わない場合の使用可能な通信帯域からその分を差し引いたものを使用可能な通信帯域とする。QoS が保証される車両台数の計算や QoS 予測・予約に必要な通信帯域は表 1 に示す評価パラメータより計算する。

協調型自動運転のための通信の性能を評価するため、協調型自動運転のための通信について、サーバから車両までの通信遅延を測定する。QoS 予測・予約を行わない場合は全ての車両に対する通信遅延を求める。QoS 予測・予約を行う場合は、QoS が保証された車両に対する通信遅延の平均を求め、QoS 予測・予約を行わない場合と比較する。

4.1.2 評価結果

ネットワークシミュレーションによる通信遅延の比較を図 8 に示す。QoS 予測・予約を行わなかった場合の通信遅延は、車両台数が 20 台のときが 22ms、30 台のときが 29.8ms、40 台のときが 53.2ms、

表 1: 評価パラメータ

仮想環境	VirtualBox7.0.8
OS	Ubuntu22.04
シミュレータ	NS3 5g-lena NR Module
通信速度	25Mbps
パケットサイズ	1000byte
送信間隔	100ms
1 台あたりの QoS 予測に必要な通信帯域	10Kbps
車両台数	20~70 台

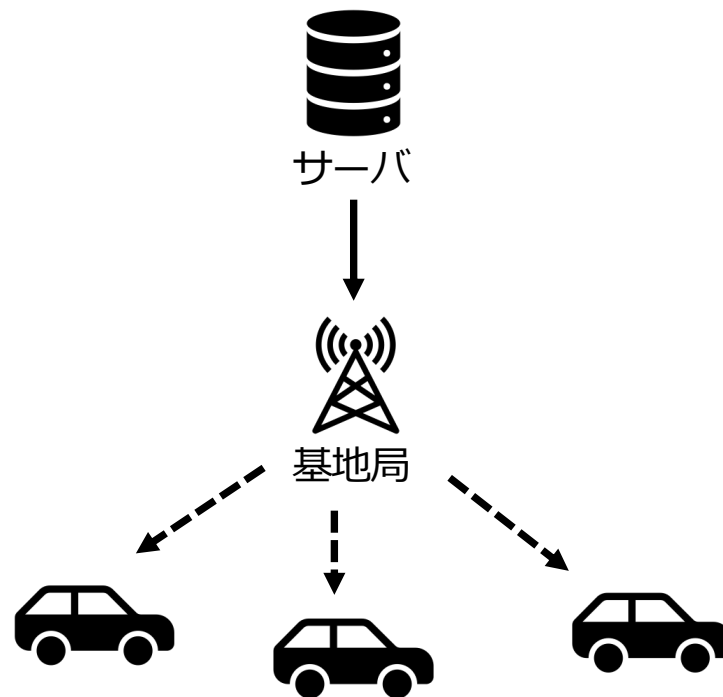


図 7: シミュレーションモデル

50 台のときが 94.5ms, 60 台のときが 103.9ms, 70 台のときが 143.6ms であった。QoS 予測・予約を行った場合の通信遅延は, 車両台数が 20 台のときは 21ms, 30 台のときは 31.1ms, 40 台のときは 54.1ms, 50 台のときは 92.1ms, 60 台のときは 92.1ms, 70 台のときが 89.1ms であった。

4.2 机上計算による評価

車両台数が多い場合の通信遅延について評価を行うため, ネットワークシミュレーションで測定した通信遅延の値をもとに, 机上計算による評価を行った。大規模な交差点で車両が集中した場合を想定し, 車両台数は 200~1000 台とした。通信速度, パケットサイズ, 送信間隔, 1 台あたりの QoS 予測に必要な通信帯域は表 1 と同一である。

机上計算による通信遅延の比較を図 9 に示す。oS 予測・予約を行わなかった場合の通信遅延は, 車両台数が 200 台のときが 275.4ms, 400 台のときが 294.2ms, 600 台のときが 311.06ms, 800 台のときが 326.02ms, 1000 台のときが 339.06ms であった。QoS 予測・予約を行った場合の通信遅延は, 車両台数が 200 台のときが 86.2ms, 400 台のときが 94.5ms, 600 台のときが 87.2ms, 800 台のときが 94.3ms, 1000 台のときが 96.8ms であった。

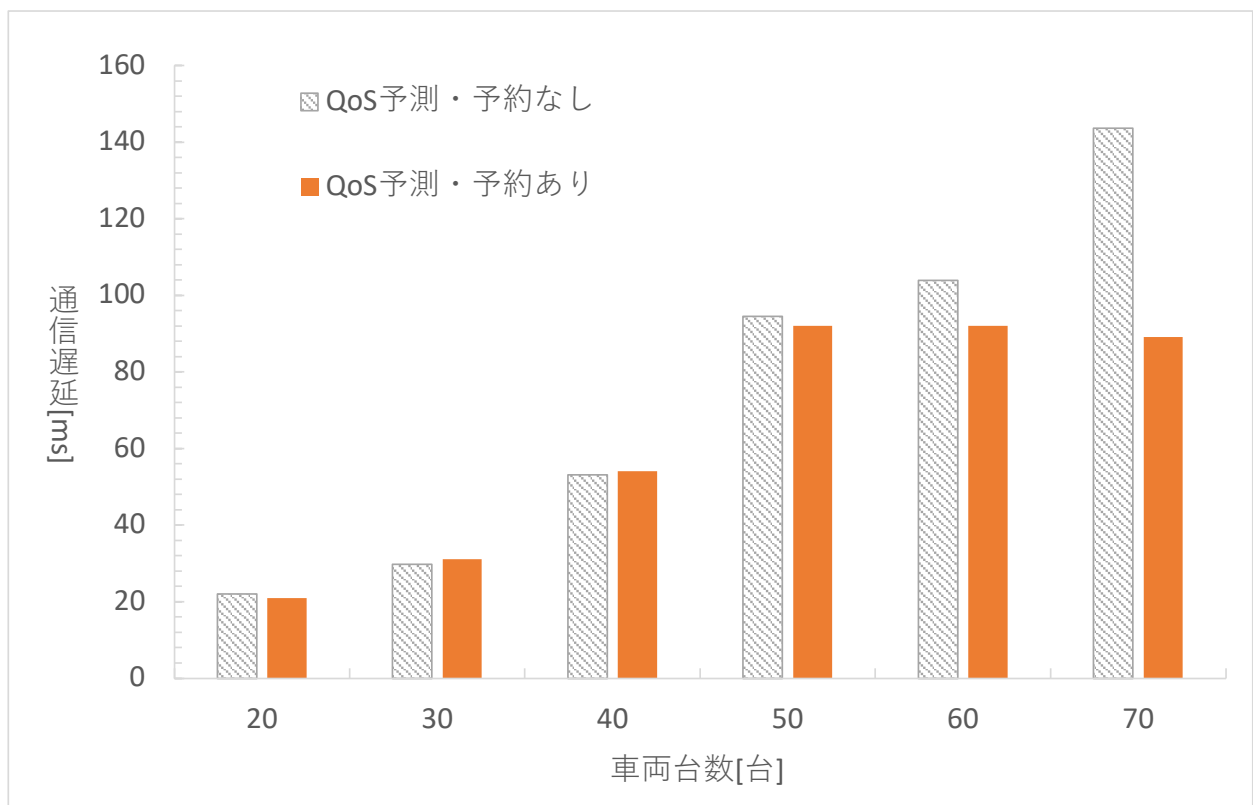


図 8: ネットワークシミュレーションによる通信遅延の比較

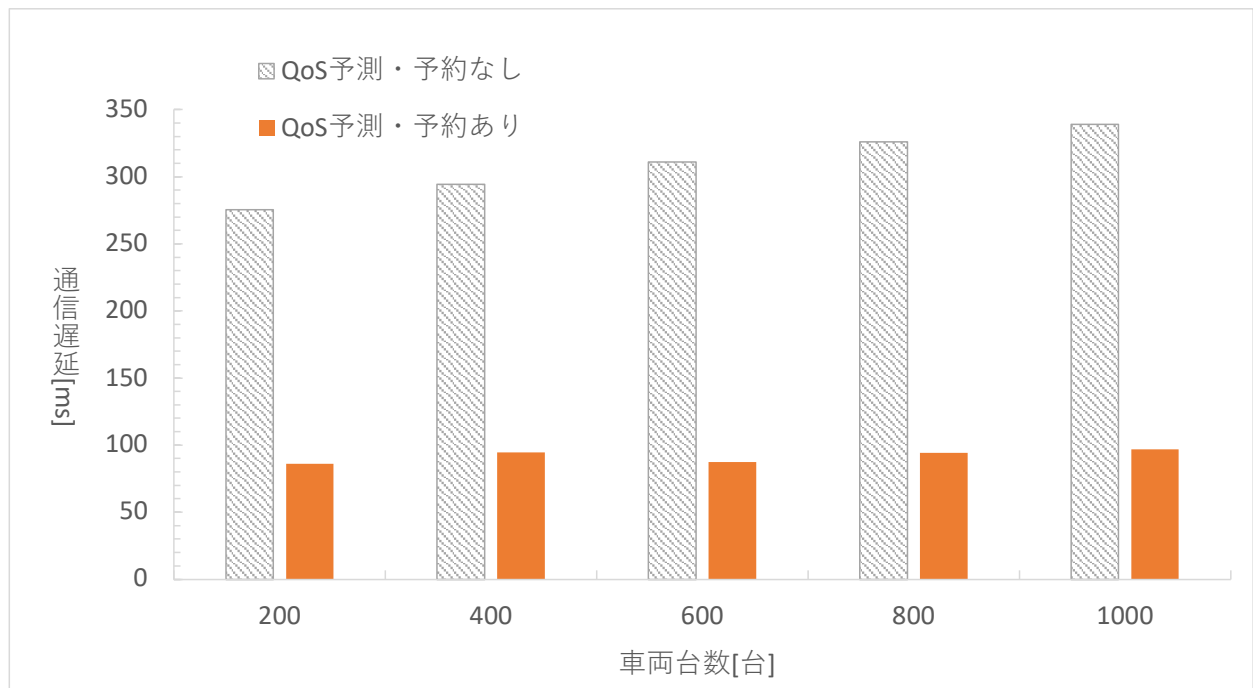


図 9: 机上計算による通信遅延の比較

第5章 考察

4.1.2 項のネットワークシミュレーションによる評価の結果より、QoS 予約の有効性について考察する。車両台数が 20~50 台のとき、QoS 予測・予約を行わなかった場合・行った場合どちらの場合も、車両台数が増加するにつれて通信遅延も増大した。車両台数が 60, 70 台のとき、QoS 予測・予約を行わなかった場合は通信遅延が協調型自動運転で許容される通信遅延である 100ms を超過したのに対して、QoS 予測・予約を行った場合は車両台数が 50 台のときと比較して通信遅延が増大せず、100ms を超過しなかった。QoS 予測・予約を行わなかった場合の通信遅延からわかるように、車両台数が 60, 70 台では通信帯域が逼迫していたため、QoS 予測・予約を行った場合では QoS 予約により通信を行う車両台数が制限されたことで、通信遅延を許容内に収めることができた。QoS 予測・予約を行った場合の車両台数が 50, 60 台のときの通信遅延は 92.1ms, 70 台のときの通信遅延は 89.1ms であり、協調型自動運転の遅延要件に近く誤差によっては 100ms を超過する可能性があるが、これは QoS 予測において使用可能な通信帯域を計算する際に、常に確保しておく余剰の通信帯域をより大きく確保することで 100ms を超過しないよう QoS を保証することができる。

4.1.2 項のネットワークシミュレーションによる評価の結果より、QoS 予測・予約のオーバーヘッドについて考察する。車両台数が 30, 40 台のときは QoS 予測・予約を行った方が通信遅延が 1~2ms ほど大きくなった。これは、QoS 予測・予約を行うために通信帯域を使用するため、全体で使用可能な通信帯域が減少し通信遅延が増大したことが原因である。しかし、車両台数が 20 台のときは QoS 予測・予約を行わなかった方が通信遅延が大きくなった。1 台あたりの QoS 予測に必要な通信帯域は 10Kbps であり、車両台数が 20 台のときは QoS 予測・予約の使用通信帯域の影響が小さかった可能性がある。また、車両台数が 50, 60 台のときと比較して、70 台のときは通信遅延が 2ms ほど小さくなった。これは、車両台数が増加することで QoS 予測・予約に必要な通信帯域が大きくなり、協調型自動運転のための通信帯域が小さくなったことにより、QoS が保証された車両台数が減少したことが原因であると考えられる。

4.2 節の机上計算による評価の結果より、QoS 予約の有効性と QoS 予測・予約のオーバーヘッドについて考察する。QoS 予測・予約を行わなかった場合は車両台数が増加するにつれて通信遅延が増大しているのに対して、QoS 予測・予約を行った場合の通信遅延は全て 90ms 前後となった。上記の考察と同様に、予約を行った場合では QoS 予約により通信を行う車両台数が制限されたことで、通信遅延が許容内に収まったと考える。また、QoS 予測・予約を行った場合の通信遅延は車両台数の増加に連動せず増減しているが、これも上記の考察と同様、車両台数が増加することで QoS 予測・予約に必要な通信帯域が大きくなり、協調型自動運転のための通信帯域が小さくなったことにより、QoS が保証された車両台数が減少したことが原因であると考えられる。

車両台数が増加することで QoS 予測・予約に必要な通信帯域が増大するため、QoS を保証できる車両数は減少するが、QoS を保証すると予約した車両に対しては、通信遅延が許容内に収められていることから QoS が保証できている。大規模な交差点において、通信帯域が逼迫した場合、全ての車両の QoS が保証されず、交差点への入出における調停の際に安全性に問題が発生する危険がある。交差点において車両が集中している場合は、すぐには交差点に入ることのない位置で列を成している

車両は周囲と協調する必要性は低く、交差点に入出する車両は他の車両と調停して走行する必要がある。そのため、QoS 予測・予約の際に、交差点に入出する車両の QoS を優先的に保証することで、交差点における調停の安全性や効率的な車両の集中の解消が可能となると考える。

第6章 おわりに

自車両の車載センサのみで認識できる範囲は限定的であるため、他の車両や路側機のセンサの情報をサーバを利用して共有することで安全かつ効率的な走行を目指す協調型自動運転の研究が行われている。協調型自動運転に用いられるサーバは、処理負荷の分散や通信遅延の軽減のために地理的に分散配置されており、そのサーバの管轄するエリア内にいる車両や路側機の情報を集約・統合する。しかし、サーバまでの通信帯域は限られている場合が多く、車両が管轄エリア内に集中した場合に通信帯域が逼迫する恐れがある。協調型自動運転では低遅延での通信が求められるが、通信帯域が逼迫すると、許容される遅延時間内に情報を受け取ることができず、通信の QoS が保証されない。また、車両は事前に通信の QoS が保証されるか否かを把握することができないままに協調型自動運転を試みることになるため、安全性や効率の点で重大な問題となる。

本研究では、ネットワーク仮想化技術を利用した QoS 予測・予約を行った。ネットワーク仮想化技術を利用することで、QoS 予測に必要な情報の集約と、QoS 予約に必要な通知を行った。コントローラは集約した情報から、ある時刻でのサーバの管轄エリア内の車両台数と車両の運転操作を計算し、必要となる通信帯域を予測した。保持する情報から使用可能な通信帯域を計算し、必要となる通信帯域と比較することで QoS を予測した。また、QoS 予測の結果から、QoS を保証する車両を決定し、車両に通知することで QoS を予約した。使用可能な通信帯域が十分にある場合は全ての車両に対して QoS を予約し、通信帯域が十分でない場合は車両のその時刻での運転操作から通信帯域が確保されるべき優先度を考慮し、QoS を保証する車両を決定した。

サーバから車両へと情報を送信する通信モデルを構築し、ネットワークシミュレーションを行うことで提案手法の有効性を検証した。QoS 予測・予約を行わない場合と行う場合において通信遅延を比較し、通信帯域が逼迫した場合にも通信する車両台数を制限することで、通信遅延を協調型自動運転の許容される遅延時間内に収められることを示した。今後協調型自動運転の開発・研究が進み、V2X 通信のデータ量が増加すると考えられる中で、QoS 予測・予約を用いることで通信帯域の逼迫の発生を防ぎ、事前に車両の QoS を保証することが可能であることを示した。

謝辞

本研究を進めるにあたって，多大なご指導とご支援を賜りました同志社大学大学院理工学研究科の佐藤健哉教授に心より感謝いたします．また，研究内容について親身にアドバイスをくださったネットワーク情報システム研究室のみなさまには，大変お世話になりました．さらに，大きな心の支えとなってくださった友人と家族へ感謝いたします．

参考文献

- [1] 横山俊夫, 波多野邦道, 小沢浩一郎, 樋山智, 小高賢二, 自動車業界における自動運転実用化に向けた取り組み, 学術の動向, Vol.25, No.5, pp.17-21 (2020).
- [2] 辰巳周一, 樋口竜貴, 染谷竜太, 協調型自動運転の実現に向けた最新の技術動向と課題, 電気学会誌, Vol.140, No.5, pp.308-311 (2020).
- [3] 菅沼英明, ITS・自動運転の動向と今後, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, Vol.15, No.2, pp.102-108 (2021).
- [4] Fuhui Zhou, Rose Qingyang Hu, Zan Li and Yuhao Wang, Mobile edge computing in unmanned aerial vehicle networks, *IEEE Wireless Communications*, Vol.27, No.1, pp.140-146 (2020).
- [5] Ignacio Soto, Maria Calderon, Oscar Amador and Manuel Uruena, A survey on road safety and traffic efficiency vehicular applications based on C-V2X technologies, *Vehicular Communications*, Vol.33, No.100428 (2022).
- [6] 5G Automotive Association (5GAA), Proactive and Predictive: How contributes to enhanced safety and driving automation, White Paper.
- [7] Md. Noor-A-Rahim, Zilong Liu, Haeyoung Lee, G. G. Md. Nawaz Ali, Dirk Pesch and Pei Xiao, A Survey on Resource Allocation in Vehicular Networks, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, No.2, pp.701-721 (2020).
- [8] Michael Taynnan Barros, Gorka Velez, Harbil Arregui, Estibaliz Loyo, Kanika Sharma, Andoni Mujika and Brendan Jennings, CogITS: cognition-enabled network management for 5G V2X communication, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol.14, No.3, pp.182-189 (2020).
- [9] Sokratis Barmounakis, Nikolaos Maroulis, Nikolaos Koursioupas, Apostolos Kousaridas, Angeliki Kalamari, Panagiotis Kontopoulos and Nancy Alonistioti, AI-driven, QoS prediction for V2X communications in beyond 5G systems, *Computer Networks*, Vol.217, No. 109341 (2022).
- [10] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser and Illia Polosukhin, Attention Is All You Need (2017). <https://arxiv.org/abs/1706.03762>
- [11] Haoyi Zhou, Shanghang Zhang, Jieqi Peng, Shuai Zhang, Jianxin Li, Hui Xiong and Wancai Zhang, Informer: Beyond Efficient Transformer for Long Sequence Time-Series Forecasting, *AAAI2021*, Vol.35, pp.11106-11115 (2021).
- [12] Yaqi Xu, Yan Shi, Yuming Ge, Shanzhi Chen and Longxiang Wang, Informer-based QoS prediction for V2X communication: A method with verification using reality field test data, *Computer Networks*, Vol.235, No.109958 (2023).

- [13] Zoraze Ali, Sandra Lagen, Lorenza Giupponi and Richard Rouil, 3GPP NR V2X Mode 2: Overview, Models and System-Level Evaluation, *IEEE Access*, Vol.9, pp.89554-89579 (2021).

研究業績

- [1] 国本 典晟, 佐藤 健哉, "SDN を利用した QoS 予測・予約による V2X 通信のシミュレーション評価", 第 109 回 MBL・第 95 回 ITS 合同研究発表会, 2023.
- [2] 国本 典晟, 滕 睿, 佐藤 健哉, "SDN を利用した QoS 予測・予約による V2X 通信の信頼性向上," 第 20 回 ITS シンポジウム 2022, 2022.
- [3] 東田 悠希, 国本 典晟, 滕 睿, 佐藤 健哉, "車両走行状態とドライバ視線の時系列変化を考慮した運転支援情報提示の制御手法, " 情報処理学会 第 85 回全国大会, 2023.